




Influência da altitude em cafés produzidos na Serra da Canastra utilizando modelos com covariâncias espaciais

Laryssa Ribeiro CALCAGNOTO *¹, Diana Del Rocío Rebaza FERNÁNDEZ ^{1,2},
Marcelo Ângelo CIRILLO ¹, Helena Maria Ramos ALVES ³, Flávio Meira BORÉM ¹

¹ Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, Brasil.

² Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Peru.

³ Embrapa Café, Brasília, DF, Brasil.

*E-mail: laryssa.calcagnoto1@estudante.ufla.br

Submetido em 07/06/2023; Aceito em 05/03/2024; Publicado em: 08/03/2024.

RESUMO: Este estudo investiga a qualidade sensorial dos cafés produzidos na região da Serra da Canastra, em Minas Gerais, Brasil, considerando a influência da altitude e métodos de processamento. Utilizando um modelo linear misto, que incorpora efeitos aleatórios e fixos, analisou-se a nota final atribuída na análise sensorial dos cafés. O objetivo foi avaliar a estrutura de correlação espacial no modelo, considerando a pontuação final > 83 pontos. Os resultados indicaram que o modelo com a estrutura de correlação espacial obtida por meio do semivariograma exponencial proporcionou uma melhor explicação para as variações entre as unidades. Isso sugere que a variabilidade espacial desempenha um papel importante na determinação da qualidade sensorial dos cafés, particularmente em relação à pontuação final na análise sensorial. Este estudo destaca a relevância dos modelos mistos na análise sensorial de cafés, especialmente quando consideram a estrutura de correlação espacial.

Palavras-chave: análise sensorial; modelo linear misto; correlação espacial.

Influence of altitude on coffee quality in the Serra da Canastra region: spatial analysis with a mixed model

ABSTRACT: This study investigates the sensory quality of coffee produced in the Serra da Canastra region of Minas Gerais, Brazil, considering the influence of altitude and processing methods. Using a mixed linear model that incorporates random and fixed effects, the final score assigned in the sensory analysis of the coffees was analyzed. The objective was to evaluate the spatial correlation structure in the model, considering the final score > 83 points. The results indicated that the model with the spatial correlation structure obtained through the exponential semivariogram provided a better explanation for the variations among the units. This suggests that spatial variability plays an important role in determining the sensory quality of coffees, particularly concerning the final score in sensory analysis. This study highlights the relevance of mixed models in the sensory analysis of coffees, especially when considering spatial correlation structure.

Keywords: sensory analysis; mixed linear model; spatial correlation.

1. INTRODUÇÃO

A busca por cafés de alta qualidade vai além das fronteiras, exigindo a compreensão dos diversos aspectos que influenciam o sabor da bebida. A qualidade do café está intrinsecamente ligada à sua origem geográfica, pois cada região confere características únicas aos grãos, resultando em uma ampla gama de sabores que refletem sua proveniência.

Dentre os fatores que contribuem para a produção de cafés de qualidade, a denominação de origem, principalmente caracterizada pela região geográfica, desempenha um papel crucial. Volsi et al. (2019) conduziram um estudo sobre a evolução da cafeicultura no Brasil, utilizando dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2018). Eles apontaram evidências de mudanças na distribuição geográfica da produção e nas variedades de café ao longo do tempo.

Diante desse contexto, os pesquisadores empreenderam um levantamento da distribuição geoespacial das microrregiões brasileiras voltadas para a cultura do café.

Concluíram que as microrregiões do sudeste do país, especializadas na produção de variedades de arábica, concentram-se principalmente em Minas Gerais, responsável por metade da produção nacional de café (Terra et al., 2019). Essa região também representa 15% da produção mundial de café, conforme destacado por Krishnan (2017). Por outro lado, a produção de café conilon (robusta) tem sua predominância em Rondônia, enquanto o Espírito Santo abriga microrregiões especializadas na produção de arábica e conilon.

Nesse cenário, a região sudeste ganha destaque, com o estudo realizado por Borém et al. (2019), que analisaram a qualidade sensorial do café cultivado na microrregião da Serra da Mantiqueira. Eles investigaram variedades de frutos de café vermelho e amarelo (*Coffea arabica* L.) cultivadas em ambientes com diferentes declividades e altitudes variando de 932m a 1391m, considerando amostras de três safras distintas. Os resultados indicaram que a produção de cafés

especiais nessa região é mais bem caracterizada em altitudes superiores a 1050m.

Kamal et al. (2021) conduziram um estudo sobre o impacto da altitude na produção de café *Coffea arábica* na região do Nepal. Eles classificaram a altitude em sete intervalos (800 – 1500m), com variação de 100m, e observaram que o aumento da altitude resultou em cafés com características sensoriais mais pronunciadas, como corpo, acidez, aroma e sabor, especialmente em altitudes superiores a 1300m. No entanto, notaram também uma redução no teor de cafeína nos cafés produzidos em altitudes mais elevadas, corroborando descobertas anteriores de Kassaye et al. (2017) em cafés especiais da Etiópia.

Assim, há evidências para afirmar que de fato, a cafeína está relacionada com o amargor, portanto, menor quantidade de cafeína, implica em cafés menos amargos, de forma, a corroborar com cafés de maior preferência ao consumidor.

Além dos fatores externos que influenciam a qualidade sensorial dos cafés, com destaque ao efeito da altitude, Joët et al. (2010), mencionam que a influência da composição do grão de café, depende das condições solos-climáticas, como por exemplo, tipo de solo e exposição solar podem influenciar o teor de cafeína, portanto, um trabalho de gestão agrícola é recomendável.

Em função de todos estes fatores, a qualidade da bebida, segundo Pereira et al. (2017) é determinada pelos provedores, baseando-se em suas próprias opiniões e experiências ao longo de anos.

Neste contexto, a informação referente a procedência do café, ou informações ambientais pode ser um diferencial na percepção sensorial do provador. Desta forma, partindo do pressuposto que um modelo linear misto aplicado, a análise sensorial de cafés, permite incorporar informações aleatórias sobre o erro de medição, bem como, o alcance de uma dependência espacial entre as amostras coletadas, tende a agregar informações mais precisas em relação a determinação da qualidade da bebida.

Com esta perspectiva, este trabalho tem por objetivo propor um modelo linear misto com estruturas de correlações espaciais, aplicado a uma análise sensorial de cafés produzidos em diferentes altitudes com diferentes tipos de processamento na região da Serra da Canastra.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Descrição do conjunto de dados

O conjunto de dados foi obtido por meio da análise sensorial dos cafés produzidos na região cafeeira da Canastra, situada na porção sul/sudoeste do estado de Minas Gerais, delimitada por um retângulo com as seguintes coordenadas: 19° 51' a 20° 43' de Latitude Sul e 45° 48' a 47° 70' de Longitude Oeste (Figura 1).

A região possui uma grande variação de altitude. Segundo o Inpe (2022), a altitude mínima registrada é de 602 metros, a máxima de 1.502 metros e a média de 874 metros. Geralmente, altitudes mais elevadas estão associadas à produção de cafés de qualidade superior (Borém et al., 2020; Ramos et al., 2016).

Para a coleta das amostras, foram considerados 69 pontos geográficos distribuídos por toda a área de estudo. Cada amostra coletada foi submetida a três diferentes métodos de processamento, com a seguinte codificação: café natural (proc = -1), cereja descascado (proc = 0) e cereja descascado e desmucilado (proc = 1), totalizando 201 amostras durante o período de estudo de 2018 a 2020.

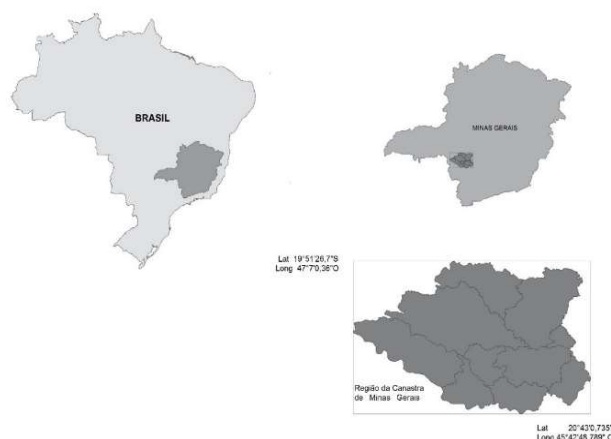


Figura 1. Localização da região da Canastra no estado de Minas Gerais. Fonte: Inpe (2022).

Figure 1. Location of the Canastra region in the state of Minas Gerais. Source: Inpe.

As amostras utilizadas na análise sensorial foram caracterizadas por grãos chatos retidos nas peneiras 16, 17 e 18 e isentos de defeitos. Em seguida, uma subamostra de 300 gramas foi retirada para torrefação.

Para cada tipo de processamento, foram avaliadas as características sensoriais de aroma, sabor, acidez e corpo por três provedores treinados e qualificados. A intensidade dos atributos doçura, acidez, corpo, adstringência, amargor e finalização foi avaliada em uma escala de 0 a 10 pontos.

Com base na avaliação das características, foi atribuída uma nota final para cada café.

2.2. Ajuste do modelo linear misto com variabilidade espacial

O ajuste do modelo linear misto com estruturas de covariância espaciais foi realizado por meio da equação (1)

$$Y = X\beta + Zu + \xi, \quad (01)$$

em que: Y representa as notas finais dos cafés produzidos na região da Serra da Canastra, com pontuação superior a 83 pontos; X é a matriz de delineamento de efeito fixo, definida pelas covariáveis de coordenadas espaciais (latitude e longitude) e pelo tipo de processamento.

No caso, da matriz Z especificada aos efeitos aleatórios, considerou o intercepto aleatório para altitudes discriminadas em três faixas: Altitude inferiores a 800m (Alt. < 800); entre 800 e 1000m (800 ≤ Alt. < 1000m) e superiores a 1000 m (Alt. ≥ 1000m). Logo, três parâmetros aleatórios foram estimados.

Considerando que os valores esperados dos erros são nulos (2) e as estruturas de covariância são particionadas com variação explicitada entre e dentro dos níveis dos fatores (3), as estimativas dos parâmetros do modelo (1) foram obtidas procedimento iterativo com a aplicação do método REML (CORBEIL; SEARLE, 1976).

$$E \begin{bmatrix} \xi \\ \mu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (02)$$

$$\text{Var} \begin{bmatrix} \xi \\ \mu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 \\ 0 & G \end{bmatrix} \quad (03)$$

As estruturas de covariância para a variabilidade espacial foram incorporadas na componente G (3), especificada como covariância entre as predições dos efeitos aleatórios u (Faixa de altitude).

Os semivariogramas foram ajustados assumindo isotropia, com h definido pela distância euclidiana entre os locais físicos representados pelas coordenadas de latitude e

longitude onde as notas superiores a 83 pontos foram coletadas.

Desta forma, procedeu-se ao ajuste dos parâmetros dos semivariogramas isotrópicos para os modelos: exponencial, gaussiano e esférico. Sua relação com o erro experimental foi estabelecida por meio das funções de distância (Stroup, 1989; Wolfinger, 1993), conforme descrito na Tabela 1.

Tabela 1. Comparações entre médias para os rendimentos em carvão vegetal. Descrição dos principais modelos de semivariograma e suas funções de distâncias de h em função dos modelos especificados, pelo efeito pepita (c_a).

Table 1. Comparisons of means for charcoal yield. Description of the main semivariogram models and their distance functions in terms of the specified models, considering the nugget effect (c_a).

Modelo	Função de distância	Semivariograma
Esférico	$f(h) = \left[1 - \frac{3h}{2c_a} + \frac{1}{2} \left(\frac{h}{c_a} \right)^3 \right] I(h < c_a)$	$\gamma(h) = c_0 + \sigma^2 \left\{ 1 - \left[1 - \frac{3h}{2c_a} + \frac{1}{2} \left(\frac{h}{c_a} \right)^3 \right] I(h < c_a) \right\}$
Exponencial	$f(h) = \left[\exp\left(1 - \frac{h}{c_a}\right) \right]$	$\gamma(h) = c_0 + \sigma^2 \left[1 - \exp\left(\frac{h}{c_a}\right) \right]$
Gaussiano	$f(h) = \exp\left(-\frac{h^2}{c_a^2}\right)$	$\gamma(h) = c_0 + \sigma^2 \left[1 - \exp\left(\frac{h^2}{c_a^2}\right) \right]$

Fonte: Wolfinger, 1993.

Assim, as componentes da variância para os erros (3) foram redefinidas conforme as expressões descritas em (4):

$$\begin{aligned} \text{Var}(\xi) &= R = c_a I + \sigma_\xi^2 F_\xi ; \\ \text{Var}(u) &= G = c_a I + \sigma_u^2 F_u. \end{aligned} \tag{04}$$

em que: F_ξ e F_u são matrizes de dimensões n×n e g×g, respectivamente, sendo “g” o número de efeitos aleatórios, a ser definido pelas variações com intercepto para as faixas de altitude.

Cada elemento da matriz foi calculado pelas funções f(h), (Tabela 1), relacionadas aos modelos ajustados de semivariograma.

Com a redefinição das matrizes R e G, incluindo parâmetros relativos às informações espaciais, as estimativas dos efeitos aleatórios e fixos foram obtidas numericamente pela resolução do sistema (5) (Coelho; Pinheiro, 1997).

$$\begin{bmatrix} \hat{\beta} \\ \hat{\mu} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (X^t V^{-1} X)^{-1} X^t V^{-1} Y_r \\ G Z^t V^{-1} (Y_r - X \hat{\beta}) \end{bmatrix} \text{ com } V = ZGZ^t + R \tag{05}$$

3. RESULTADOS

Os resultados apresentados na Tabela 2 consistem nas estimativas dos parâmetros considerados aleatórios no modelo misto ajustado. Essas estimativas foram obtidas com o objetivo de verificar a existência de variabilidade espacial, levando em consideração as estruturas de covariância espacial mencionadas na metodologia.

Tabela 2. Estimativas dos parâmetros aleatórios.

Table 2. Estimates of the random parameters.

Parâmetros do modelo do semivariograma	Modelo Exponencial	Modelo Gaussiano	Modelo Esférico
Efeito Pepita	0,7037	0,7381	0,9891
Alcance	9,0000	4,4286	2,1429

Os parâmetros do modelo do semivariograma foram analisados e comparados. Observa-se que o modelo Exponencial exibiu o menor efeito pepita (0,7037), indicando uma menor componente de variância não estruturada. Por outro lado, o modelo Esférico mostrou o maior efeito pepita (0,9891), sugerindo uma maior variabilidade não explicada pela estrutura espacial.

Quanto ao alcance, o modelo Exponencial apresentou o maior valor (9,000), indicando uma correlação significativa entre os pontos de dados em distâncias maiores. Por outro lado, o modelo Esférico teve o menor alcance (2,1429), sugerindo uma rápida diminuição na correlação espacial.

Na sequência, é apresentado o semivariograma para as três estruturas de correlação espacial (Figura 2).

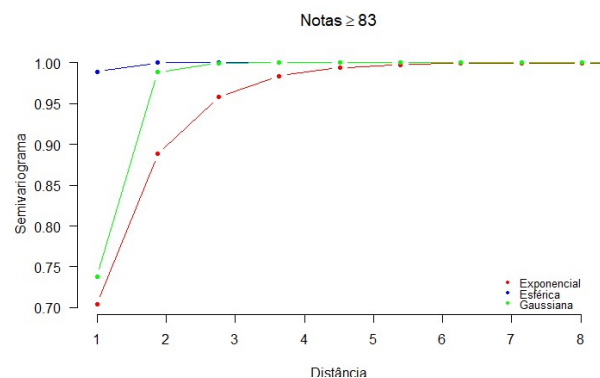


Figura 2. Semivariograma ajustado para os modelos de semivariogramas considerados para estudo da nota final da avaliação sensorial dos cafés, com pontuação acima de 83 pontos. Fonte: Os autores, 2022.

Figure 2. Adjusted semivariogram for the semivariogram models considered for studying the sensory evaluation final score of coffees with scores above 83 points.

Os resultados apresentados na Figura 2 evidenciam que, para o modelo esférico, a estimativa do efeito pepita está próxima ao patamar, sugerindo uma baixa variância espacial.

Além disso, observa-se um alcance relativamente baixo, indicando uma transição rápida para a independência espacial. Por outro lado, os modelos gaussiano e exponencial exibem uma transição mais lenta e uma variabilidade espacial maior (aproximadamente 0,30).

No contexto analisado, é possível inferir que, no modelo esférico, a variabilidade atinge seu ponto máximo para a variável nota final, enquanto os pontos amostrados demonstram independência entre si. Por outro lado, ao observar os demais modelos (conforme representado na Figura 2), nota-se que o modelo exponencial se destaca em relação aos demais, lidando com dados nos quais a correlação espacial se manifesta de maneira significativa em distâncias maiores.

4. DISCUSSÃO

Diante dessas observações, os resultados apresentados na Tabela 3 correspondem as estimativas dos coeficientes aleatórios para as diferentes classes de altitudes.

Tabela 3. Estimativas dos parâmetros considerando apenas o intercepto para diferentes faixas de altitudes em função do modelo com estruturas de covariâncias espaciais.

Table 3. Estimates of the parameters considering only the intercept for different altitude ranges, as a function of the model with spatial covariance structures.

Parâmetros	Exponencial	Gaussiano	Esférico
β_1 (Alt. ≥ 1000)	0,3474	0,3785	0,3785
β_2 (800 \leq Alt. <1000)	-0,1815	-0,1920	-0,1920
β_3 (Alt. < 800)	-0,1660	-0,1866	-0,1866

De um modo geral, para o modelo com as três estruturas consideradas, os coeficientes aleatórios, representados pelo intercepto evidenciam que o efeito de altitude é similar para os três modelos. Todavia, para as localizações com Altitude ≥ 1000 , apresentou um efeito levemente mais diferenciado em relação aos demais.

Uma possível explicação para a homogeneidade dos resultados, em relação as classes de altitude, bem como, a pequena diferenciação entre a média, representada pelo intercepto aleatório, para altitudes superiores a 1000m é corroborada pelo relatório técnico (PROCIÊNCIA-SEBRAE, 2021), o qual, em um levantamento da região verificou que as lavouras de cafés se encontram predominantemente nas superfícies mais aplainadas ou de relevo suave ondulado e em altitudes de 800 a 900 metros.

Ainda em relação à altitude, aproximadamente 30% de lavouras estão plantadas abaixo de 800 metros, mas aproximadamente 7% das áreas de café da região encontram-se acima de 1000 metros (Figura 3).

5. CONCLUSÕES

O uso do modelo misto com estruturas de covariâncias espaciais, atendeu o propósito de diagnosticar a variabilidade espacial em função de um preditor linear que contempla efeitos aleatórios para diferentes classes de altitudes. Neste contexto, a aplicação nas notas finais dos cafés produzidos na região da Canastra não apresenta uma variabilidade espacial com grandes contribuições nas estimativas dos parâmetros dos efeitos aleatórios representados por diferentes faixas de altitudes.

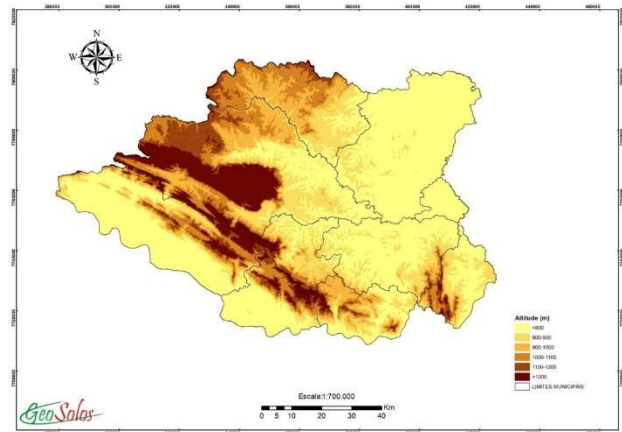


Figura 3. Mapa de classes da altitude da região da Canastra. Figure 3. Altitude class map of the Canastra region.

6. REFERÊNCIAS

- BOREM, F. M.; CIRILLO, M. A.; ALVES, A. P. C.; SANTOS, C. M.; LISKA, G. R.; RAMOS, M. F.; LIMA, R. R. Coffee sensory quality study based on spatial distribution in the Mantiqueira mountain region of Brazil. *Journal of Sensory Studies*, v. 35, n. 2, e12552, 2020. <https://doi.org/10.1111/joss.12552>
- CAMBARDELLA, C. A.; MOORMAN, T. B.; NOVAK, J. M.; PARKIN, T. B.; KARLEN, D. L.; TURCO, R. F.; KONOPKA, A. E. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. *Soil Science Society of America Journal*, v. 58, p. 1501-1511, 1994. <https://doi.org/10.2136/sssaj1994.0361599500580005033x>
- COELHO, P.; PINHEIRO J. Modelo linear geral misto- Teoria e estudo de um caso. *Revista Estatística*, v. 3, p. 63-86, 1997.
- CORBEIL, R.; SEARLE, S. Restricted Maximum Likelihood (REML) estimation of variance components in the mixed model. *Technometrics*, v. 18, p. 31-38. 1976. DOI: <https://doi.org/10.2307/1267913>
- JOËT, T.; LAFFARGUE, A.; DESCROIX, F.; DOUBLEAU, S.; BENOIT, B. KOCHKO, A.; DUSSERT, S. Influence of environmental factors, wet processing and their interactions on the biochemical composition of green Arabica coffee beans. *Food Chemistry*, v. 118, n. 3, p. 693-701, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.05.048>
- KAMAL, B. K.; ACHARYA, B.; SRIVASTAVA, A.; PANDEY, M. Effect of different Altitudes in Qualitative and Quantitative Attributes of Green Coffee Beans (Coffea arabica) in Nepal. *International Journal of Horticulture, Agriculture and Food Science*, v. 5, n. 3, p. 1-7, 2011. <https://dx.doi.org/10.22161/ijhaf.5.3.1>
- KRISHNAN, S. Sustainable Coffee Production. *Oxford Research Encyclopedia, Environmental Science*. Development of the Global Strategy for Conservation of Coffee Genetic Resources, 2017, 29p. <https://doi.org/10.1093/acrefore/9780199389414.013.224>
- IBGE_Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Database: Sistema IBGE de Recuperação Automática.** Disponível em <<http://www.sidra.ibge.gov.br>>. Acesso em: 06 junho 2023.

- INPI_Instituto Nacional de Propriedade Industrial. **Dossie Denominação de Origem (DO): “CANASTRA” para Café em grãos crus, beneficiados, torrados e moídos**. nº BR 412022000012-6, Portaria/INPI/PR nº 04, de 12 de janeiro de 2022. Disponível em: http://revistas.inpi.gov.br/pdf/Indicacoes_Geograficas2729.pdf. Acesso em: 06 junho 2023.
- PEREIRA, L. L.; CARDOSO, W. S.; GUARÇONI, R. C.; FONSECA, A. F. A.; MOREIRA, T. R.; CATENA, C. S. T. The consistency in the sensory analysis of coffees using Q-graders. **European Food Research and Technology**, v. 243, p. 1545-1554, 2017. <https://doi.org/10.1007/s00217-017-2863-9>
- RAMOS, M. F.; RIBEIRO, D. E.; CIRILLO, M. A.; BORÉM, F. M. Discrimination of the sensory quality of the *Coffea arabica* L. (cv. Yellow Bourbon) produced in different altitudes using decision trees obtained by the CHAID method. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 96, p. 3543-3551, 2016. <https://doi.org/10.1002/jsfa.7539>
- SEBRAE. **Resultados das atividades desenvolvidas no âmbito do contrato celebrado entre o Serviço de Apoio às Micro e Pequenas Empresas de Minas Gerais**. Belo Horizonte: Sebrae-MG e a Prociência Desenvolvimento de Projetos Ltda – ME, 2021. 60p.
- STROUP, W. **Predictable functions and prediction space in the mixed model procedure, in Applications of mixed models in agricultural and related disciplines**, Baton Rouge: Louisiana agricultural experiment station, 1989. p. 39-48. (Southern Cooperative Series Bulletin, 343)
- TERRA, W. C.; SALGADO, S. M. L.; FATOBENE, B. J. R. Expanded geographic distribution of *Meloidogyne paranaensis* confirmed on coffee in Brazil, **Plant Disease**, v. 103, n. 3, p. 589, 2019. <https://doi.org/10.1094/PDIS-09-18-1502-PDN>
- TOLESSA, K.; D’HERR, J.; DUCHATEAU, L.; BOECKX, P. Influence of growing altitude, shade and harvest period on quality and biochemical composition of Ethiopian specialty coffee. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 97, n. 9, p. 2849-2857, 2017. <https://doi.org/10.1002/jsfa.8114>
- VOLSI, B.; TELLES, T. S.; CALDARELLI, C. E.; CAMARA, M. R. G. The dynamics of coffee production in Brazil. **Plos One**, v. 14, n. 7, e0219742, 2019. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0219742>
- WOLFINGER, R. Covariance structure selection in general mixed models, **Communications in Statistics - Simulation and Computation**, v. 22, n. 4, p. 1079-1106, 1993. <http://dx.doi.org/10.1080/03610919308813143>

Agradecimentos: Os autores agradecem ao CNPq pelo apoio financeiro ao projeto de Bolsa de Produtividade e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

Contribuição dos autores: L.R.C., D.D.R.R.F. e M.A.C. - análise estatística, redação, conceituação; H.M.R.A. e F.M.B. - investigação ou coleta dos dados, administração pública; M.A.C - aquisição de financiamento. Todos os autores leram e concordaram com a versão publicada do manuscrito.

Financiamento: CNPq Processo 304939/2021-8.

Disponibilização de dados: Os dados deste estudo são de natureza sigilosa e, por isso, não poderão ser disponibilizados.

Conflito de interesses: Os autores declaram não haver conflito de interesses. As entidades de apoio não tiveram qualquer papel na concepção do estudo; na coleta, análise ou interpretação de dados; na redação do manuscrito ou na decisão de publicação dos resultados.